

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800224

研究課題名(和文) 単一原子の無損失状態検出による光子の非破壊オンオフ検出

研究課題名(英文) Non-destructive ON/OFF detection of photons by lossless state detection of single atoms

研究代表者

竹内 誠 (TAKEUCHI, Makoto)

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：60552106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：光が通過したか通過しなかったかを判別する、光に対して透明な検出器を作りたい。そのために、対向させた鏡(光共振器)の間に原子を置き、原子の自転方向(角運動量)を光で操作できるようにする。この科研費助成事業の支援を受け、チタンサファイア結晶を利用したレーザー、及び半導体を利用したレーザーが出射する光の周波数が、原子の固有振動数と一致し続けるよう、周波数制御装置を製作した。また、鏡の形状加工のための光の空間分布測定技術の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：I am trying to make a transparent detector to light which distinguishes whether light is passed or not. For this purpose, I am constructing a system, where an atom is placed between two mirrors (optical resonator) and the spin direction of the atom (angular momentum) is operated by light. Thanks to this KAKENHI support, I created a frequency stabilization system so that the lasers using a titanium sapphire crystal and a semiconductor can emit light at resonant frequencies of atomic transitions. In addition, I developed the spatial distribution measurement of light for the purpose of laser machining of the resonator mirrors.

研究分野：量子光学

キーワード：レーザー加工 位相同期 ラマン遷移 偏光分光 ウィグナー関数

## 1. 研究開始当初の背景

光電子増倍管やアバランシェフォトダイオードといった標準的な光子検出器では、光子の電場振動エネルギーを、検出器を構成する物質内の電子の運動エネルギーや、熱エネルギーに変換し、電気信号として検出する。そのため、光子を検出した後は、その振動電場は消えている。つまり、標準的な光子検出器は、破壊検出である。

電場振動を減衰させずに検出する、非破壊検出は、物理法則としては許容されている。実際に、共振器内に定在するマイクロ波周波数領域 ( $10^{10}$  Hz) の振動電場に対しては、非破壊検出が実現されている。振動電場により原子の内部状態変化を誘起し、原子を破壊検出することで、振動電場の非破壊検出が実現された(この実験を行った S. Haroche は、2012年にノーベル物理学賞を受賞した)。光周波数領域 ( $10^{14}$  Hz) においては、空間伝搬する振幅電場に対して、スクィーズド光を用いた全く異なる手法で、非破壊検出が実現されている。ただし、スクィーズド光が必要なため、利用範囲は限定されてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、振動電場による原子の内部状態変化を利用し、光周波数領域の空間伝搬する光子の非破壊検出を目指す。ただし、原子が持つ光周波数領域の遷移は、双極子モーメントが小さいため、誘導ラマン遷移および光共振器により双極子モーメントを増強する。

それでもなお、電場振幅の非破壊検出には感度が不足しているため、本研究はオンオフ検出を目標とした。オンオフ検出とは、光子数が「0個」あるいは「1個以上」のどちらかを識別することである。

破壊オンオフ検出は現在の量子情報処理の技術開発において、幅広く利用されている。量子情報処理では、破壊検出の結果に応じて条件分岐が行われる。情報処理が高度になるほど成功レートが下がり、実行が困難になる。非破壊オンオフ検出を適用すれば、条件分岐を簡素化、多段化でき、この困難を解決できる。

## 3. 研究の方法

Haroche らの系は、主量子数の大きい原子 (リュードベリ原子) が持つ、双極子モーメントの大きいマイクロ波周波数領域の遷移を用い、電子シェルビングという高感度な内部状態識別法を用いる工夫により、非破壊検出を実現している。

光周波数領域の遷移は双極子モーメントが小さく、電子の束縛エネルギーが大きいため、Haroche らと同じ方法は適用できない。そこで、誘導ラマン遷移による原子の内部状態変化と、光共振器を用いた自然放出レートの増強を利用し、1光子レベルの感度を目指す計画を立てた。

## 4. 研究成果

(1) チタンサファイアレーザーの発振と周波数安定化

誘導ラマン遷移には、100 mW 程度の連続出力 (CW) を持つ、チタンサファイア (Ti:S) レーザーが必要となる。所属研究室が管理している Ti:S レーザーは経年劣化のため、一部が故障し、代替品の製造が終了していた。自ら修理改造を行うため、赤外線ビューワーなど基本的なレーザー計測装置や安全装置を揃えた。最終的には、連続的な周波数掃引が可能となった。さらに、ガラス管に封入されたルビジウム原子 (Rb) を用いて、 $^2S_{1/2}-^2P_{1/2}$  遷移 (波長 795 nm) における偏光分光信号を参照し、周波数安定化を行った。

#### (2) レーザー間の位相ロック

個々のレーザーの周波数は、無相関に 1 MHz 程度、変動している。しかし、ラマン遷移を誘起するには、周波数差を超微細分裂周波数と 1 kHz 程度の精度で一致させる必要がある。そこで、波長 795 nm 周辺で周波数掃引可能な、外部共振器付き半導体レーザー (ECDL) を用い、共振器長と半導体レーザーへの注入電流を制御する、位相ロック技術を開発した。

図 1 に、干渉により測定した、ECDL と Ti:S レーザーの、周波数差の時間変化を示す。位相ロック前は Ti:S レーザーの線幅である 2 MHz 程度、周波数差が変動するが、位相ロック後は一定値となっている。

#### (3) 原子チャンバーの製作

所属研究室が管理している超高真空装置が経年劣化したため、電離真空計、

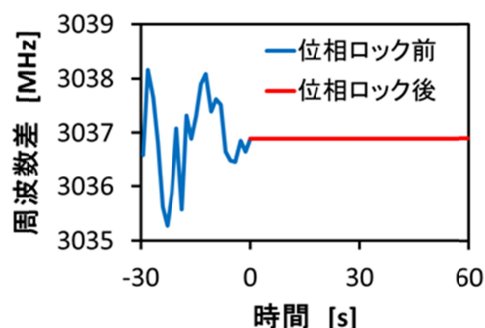


図 1 : 異なるレーザーの周波数差の安定化 (位相ロック)。

スクロールポンプ、真空配管などを新たに揃え、原子チャンバーを製作した。 $10^{-9}$  Torr 台の真空度に到達可能で、原子封入部分を加熱すれば、飽和蒸気圧で満たすことも可能である。

図 2 は、Ti:S レーザーで特定の全角運動量 (F) とドップラーシフトを持つ原子のみを  $^2P_{1/2}$  準位に励起し、 $^2S_{1/2}-^2P_{3/2}$  遷移 (波長 780 nm) 周辺で周波数掃引可能な ECDL を用いて、 $^2S_{1/2}$  準位の各準位に存在する原子数を測定した結果である。Ti:S レーザーにより、約 80 % の  $^{85}\text{Rb}$ , F=3 状態の原子が F=2 状態へ光ポンピングされている。Ti:S レーザーが十分な出力を持ち、原子を特定の内部状態に準備できることを確認した。

#### (4) 光の空間モード測定

本研究では、自然放出レートの増強のために使用する光共振器の、光学基材を自作する計画を立てた。平坦なファイバー切断面に、炭酸ガスレーザーをパルス照射すると凹面形状が形成さ

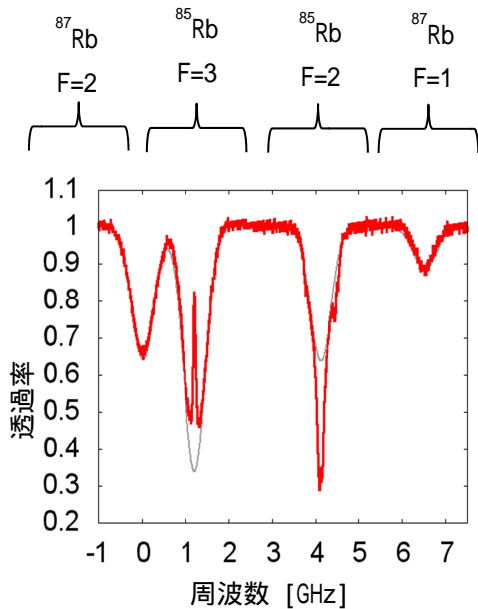


図 2 : 特定の超微細状態と速度を持つ原子の選択的な光ポンピング。

れる。その際に形成される凹面形状は微細なため、標準的な光学顕微鏡では測定できない。しかし、光の回折限界よりは大きいので、出射光の空間分布の変化から推定できると考えた。そこで、光の空間分布の測定方法と表現方法を確立した。

光の空間分布はウィグナー関数を用いて表現できる。例えば、図3は、マッハツェンダー干渉計を用いて生成した光の空間分布の測定結果から算出した、ウィグナー関数である。量子光学で登場する状態トモグラフィーやEPR相関といった概念が、波動光学にも有用なことを示す、一例である。

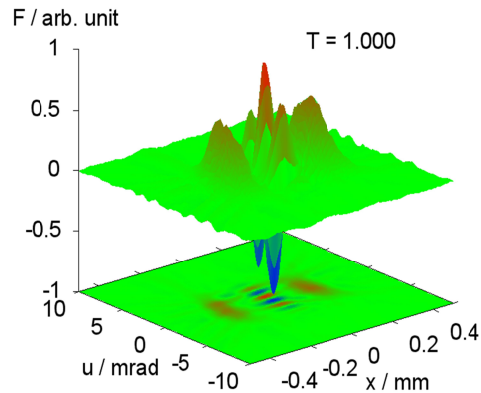


図 3 : ウィグナー関数を用いた、光の空間分布の表現。

## 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

Tatsuya Murata, Makoto Takeuchi, Takahiro Kuga, “ Phase-Locked Laser System For Atomic Coherence Experiments ”, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, 2016年06月11日～2016年06月11日、理化学研究所和光キャンパス大河内ホール (埼玉県和光市)

竹内誠、海老澤玄宜、久我隆弘、「崩壊していくシュレーディンガー猫状態の波動光学シミュレーション1」, 2015年05月25日、大阪大学豊中キャンパス基礎工学部国際棟シグマホール(大阪府豊中市)

竹内誠、久我隆弘、「光の横モード間におけるEPR相関」, 日本物理学会2014年年次大会、2014年03月27日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

竹内誠、豊浜弘海、久我隆弘、「実空間における光連続量キュービット」、日本物理学会2013年秋季大会、2013年09月26日、徳島大学三島キャンパス（徳島県徳島市）。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹内 誠 (TAKEUCHI, Makoto)

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：60552106